

Le projet européen A-ZEB, Affordable zero energy buildings (bâtiments zéro énergie à coût abordable)

PEUPORTIER Bruno et FROSSARD Mija, MINES ParisTech, 60 Bd St Michel 75272 Paris Cedex 06

bruno.peuportier@mines-paristech.fr

Mots clés : zéro énergie, coût, optimisation, Europe

Selon la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments, tous les bâtiments publics devront s'approcher d'un bilan énergétique zéro dès la fin de 2018 et les autres bâtiments deux ans après. Beaucoup craignent un renchérissement des coûts de construction.

L'objectif du projet européen A-ZEB est alors d'élaborer une méthodologie pour réduire les coûts à toutes les étapes du cycle de vie d'un projet de construction à énergie zéro (conception, construction, exploitation...). Il s'agit de recenser des technologies appropriées, d'élaborer une démarche d'optimisation technico-économique et de la tester sur des études de cas dans différents pays.

### **1 Définition des bâtiments "dont la consommation d'énergie est quasi nulle"**

Selon la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments :

- la performance énergétique d'un bâtiment est définie selon la quantité d'énergie calculée ou mesurée nécessaire à satisfaire la demande associée à un usage type du bâtiment, ce qui inclut entre autre 5 postes (le chauffage, le rafraîchissement, la ventilation, l'eau chaude sanitaire et l'éclairage).

- un bâtiment "dont la consommation d'énergie est quasi nulle" a des performances très élevées, et la quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité.

L'usage des "entre autre", "quasi nulle ou très basse", "dans une très large mesure" et "notamment" permet ainsi diverses interprétations. Le terme énergie est assez vague : il peut s'agir d'énergie "finale" (mesurée au compteur), utile (les pertes liées à l'équipement étant déduites, l'énergie utile correspond aux besoins de chauffage par exemple), ou primaire (il s'agit de remonter la chaîne jusqu'aux ressources, en prenant en compte le rendement des centrales et les pertes du réseau électrique). De même, les équivalences en énergie primaire diffèrent selon les pays car le rendement de production d'électricité dépend des technologies utilisées (il est plus élevé pour l'hydro-électricité que pour des centrales thermiques ou nucléaires). Enfin, le cas d'une production d'électricité photovoltaïque partiellement exportée vers le réseau donne lieu à débat : faut-il simplement la déduire du bilan annuel, bien qu'elle soit produite majoritairement en été alors que les besoins sont plus élevés en hiver ?

La réglementation française intègre aujourd'hui deux seuils :

- un seuil sur les besoins "bioclimatiques", qui caractérise la performance de l'enveloppe en termes de chauffage, de rafraîchissement et d'éclairage,
- un seuil en énergie primaire incluant les 5 usages mentionnés précédemment, qui intègre les équipements et la partie en amont de la chaîne.

L'expérimentation E+C- (cf. la communication de Tugdual Allain et Alexandre Pécourt), qui pourrait préfigurer la future réglementation, intègre trois autres critères :

- le bilan énergétique "BEPOS" sur l'ensemble des usages,
- l'évaluation de ses émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble de son cycle de vie (Eges) et l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des produits de construction et des équipements utilisés (PCE Eges).

Le bilan BEPOS est la somme des consommations d'énergie primaire moins la somme des productions renouvelables exportées, mais l'équivalence en énergie primaire de l'électricité exportée est de 1 alors que celle de l'électricité consommée est de 2,58. Ces coefficients sont arbitraires, et le projet A-ZEB a pour objectif de développer des méthodes plus rigoureuses, basées sur une analyse physique.

L'Institut des Maisons Passives évalue des coefficients d'équivalence en énergie primaire en prenant en compte les pertes de stockage liées aux différents usages : par exemple stockage saisonnier pour le chauffage, journalier pour l'eau chaude sanitaire (cf. la communication de Victor Hoppe).

Cela suppose un scénario énergétique 100% renouvelable, ce qui n'est pas encore le cas aujourd'hui. D'autre part, il serait utile de réduire le coût des constructions, qui constitue un frein à la généralisation des bâtiments zéro énergie. Enfin il s'agit de considérer aussi des aspects de confort et de performance environnementale. L'objet de cette communication est alors de présenter les orientations envisagées pour ces travaux de recherche, et quelques premiers résultats, en particulier concernant des études de cas.

## **2 Présentation d'une méthodologie d'optimisation**

L'objectif est, pour une performance énergétique donnée, de réduire le coût de construction, ou pour un coût donné, d'améliorer la performance. D'autres critères peuvent être prise en compte comme le confort ou les impacts environnementaux (bilan carbone par exemple). On parle alors d'optimisation multicritères.

La conception de bâtiments zéro énergie pose de multiples questions, par exemple :

- jusqu'où faut-il améliorer la performance de l'enveloppe, quelle épaisseur d'isolant mettre en œuvre, le triple vitrage est-il toujours préférable ?
- une ventilation double-flux est-elle indispensable ?
- la réduction du coût et des impacts environnementaux des modules photovoltaïques va-t-elle modifier l'optimum économique/environnemental pour donner la priorité à la production renouvelable par rapport à l'efficacité énergétique ?

L'un des moyens de répondre à ces questions est de mettre en œuvre une technique d'optimisation, par exemple basée sur un algorithme génétique (Rivallain, 2013). Les "gènes" comportent des caractéristiques concernant les épaisseurs d'isolant, les types de vitrage etc. Par croisement d'une population initiale, et par sélection des individus de génération en génération, l'algorithme permet d'identifier solutions les plus performantes, par exemple en termes de coût et de bilan énergétique.

Mais le bilan énergétique ne doit pas être une simple soustraction entre production et consommation. Il convient en effet de prendre en compte les variations saisonnière, hebdomadaire et horaire du mix de production d'électricité. Par exemple les centrales thermiques sont plus fortement mobilisées lors des périodes froides, constituant des pointes de demande d'électricité. Le mix de production influence les facteurs d'équivalence en énergie primaire, mais encore davantage les émissions de gaz à effet de serre comme le montre la figure ci-dessous basée sur des données de RTE (Réseau de Transport d'Electricité).

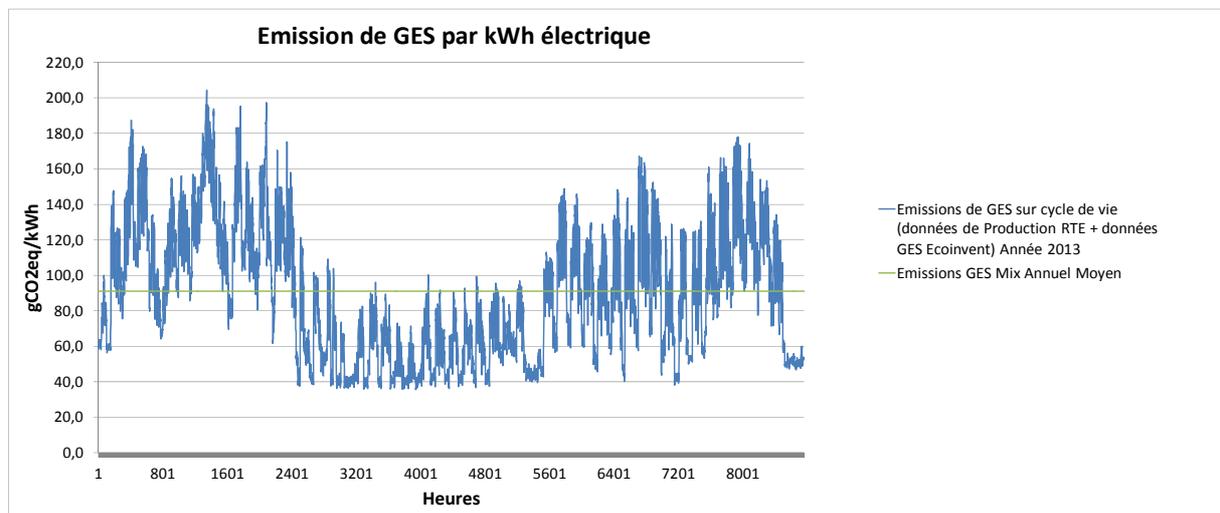


Figure 1 Variation temporelle des émissions de gaz à effet de serre (à partir de données RTE)

Ce graphe montre qu'exporter de l'électricité l'été (émissions de CO<sub>2</sub> entre 40 et 100 g/kWh) ne compense pas une consommation en période de pointe (jusqu'à 200 g CO<sub>2</sub>/kWh). Prendre en compte ces variations correspond à une analyse de cycle de vie "dynamique", qui intègre une modélisation du système électrique avec éventuellement des aspects de prospective pris en compte au moyen de scénarios.

Construire de nouveaux bâtiments augmente la demande d'énergie. Cette énergie supplémentaire n'est en général pas fournie par la moyenne du parc de production : par exemple ce peut être l'appoint d'un réseau de chaleur dont la base est la géothermie, ou une centrale thermique en période de pointe dans le cas de la fourniture d'électricité. On emploie alors le terme de "procédé marginal", et ce sont ces procédés qui sont considérés dans l'analyse de cycle de vie dite "conséquentielle" (Roux, 2016), qui prend en compte les conséquences du système étudié (un bâtiment) sur le système d'arrière plan (réseau de chaleur, système électrique...).

### 3 Exemple d'application sur deux études de cas

#### 3.1 Maison en France

À titre d'illustration, la méthodologie proposée a été appliquée (Recht, 2016 a et b) lors du processus de conception d'une maison à énergie positive du constructeur Fousse Constructions (cf. Figure 1). L'objectif annoncé est d'élaborer un prototype à bilan énergétique positif minimisant conjointement le coût de construction et les émissions de gaz à effet de serre en CO<sub>2</sub> équivalent.



Figure 1 : Maquette 3D du cas d'étude, situé proche d'Orléans (source : Fousse Constructions)

Pour explorer la performance de différents concepts de maisons, 11 variables de conception ont été considérées dans le problème d'optimisation. Cet espace de recherche a été établi en collaboration avec l'architecte, de manière à intégrer les contraintes et degrés de liberté du projet (cf. Tableau 1).

Tableau 1 : Espace de recherche du problème d'optimisation considéré

Paramètres	Unité	Valeur de base	Borne inférieure	Borne supérieure	Nombre de niveaux
Epaisseur de laine de verre des murs	cm	22	15	36	8
Epaisseur laine de verre en toiture	cm	22	15	36	8
Epaisseur polystyrène du plancher bas	cm	26	12	28	8
Surface de la fenêtre 1 (sud-est)	m <sup>2</sup>	3	2	5	4
Surface de la fenêtre 2 (sud-est)	m <sup>2</sup>	1,46	1,46	2,92	2
Surface de la fenêtre 3 (sud-ouest)	m <sup>2</sup>	6,88	0	10,5	4
Surface de la fenêtre 4 (sud-ouest)	m <sup>2</sup>	2,71	2,71	5,42	2
Type de vitrage en façade nord-est *	m <sup>2</sup>	DV	DV	TV	2
Système de ventilation *	m <sup>2</sup>	SF	SF	DF	2
Récupérateur de chaleur sur eaux grises	m <sup>2</sup>	Non	Non	Oui	2
Nombre de modules photovoltaïques	m <sup>2</sup>	12	1	28	16

\* DV : double-vitrage, TV : triple-vitrage, SF : simple-flux, DF : double-flux.

Les performances énergétiques et environnementales des individus constituant les différentes générations ont été évaluées par simulation énergétique dynamique (Peuportier, 1990) et par analyse de cycle de vie (Polster, 1995). Des modèles statistiques concernant les occupants sont considérés (Vorger, 2014). Plusieurs activités de validation ont été

menées, par exemple (Recht, 2014). Les calculs d'incertitude et d'optimisation nécessitent de lancer des milliers de simulations. La méthode de réduction de modèle utilisée dans l'outil de simulation Pleiades+Comfie permet de diminuer le temps de calcul, avec une précision comparable à celle de standards internationaux comme l'outil EnergyPlus.

Le "front de Pareto" est constitué par les solutions "non dominées", pour lesquelles il n'existe pas, à coût donné, de solution plus performante ni de solution moins coûteuse de même performance.

Le cas de base (conception initiale de l'architecte), la population initiale, le front de Pareto correspondant à la vingtième génération ont été tracés sur la Figure 2. Les solutions respectant la contrainte de bilan énergétique positif sont en ronds pleins, les autres en ronds creux. La population initiale correspond à deux nuages de points : les solutions avec une ventilation double flux forment le nuage du bas, qui présente des émissions de CO<sub>2</sub> plus basses mais un coût un peu plus élevé par rapport au nuage du haut correspondant à une ventilation simple flux.

Au sein de la population initiale, une majorité des solutions ne respecte pas la contrainte de bilan à énergie positive (cf. « non MEPOS » dans la légende), c'est pourquoi le front de Pareto obtenu (génération 20) se situe dans une région limitée de l'espace de recherche. Par rapport au cas de base, un surcoût économique est nécessaire pour atteindre l'énergie zéro, concomitant à une réduction des émissions de GES. Dans le cas considéré, ce surcoût est de 25 €/m<sup>2</sup>.

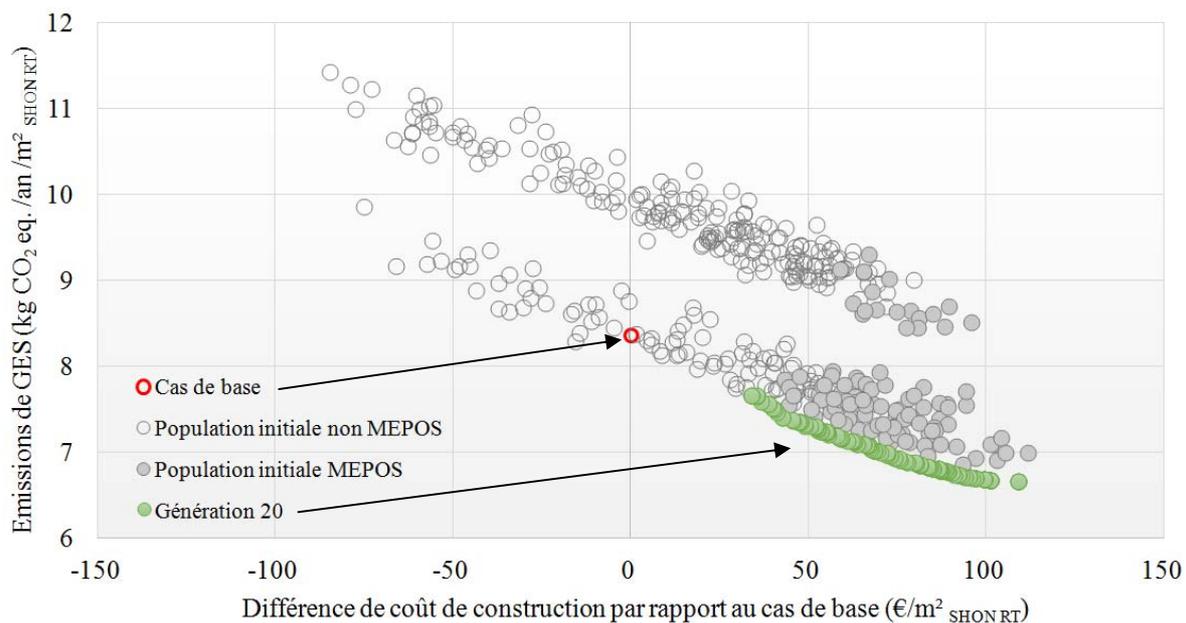


Figure 2 : Population initiale et front de Pareto final

La Figure 3 présente l'évolution des fronts de Pareto au fil des générations. Graphiquement, une progression nette du front de Pareto est observable lors des premières générations, progression qui se ralentit autour de la dixième génération. Jusqu'à la fin du processus, le front a alors davantage tendance à se densifier qu'à réellement progresser. Premier critère de sélection dans le processus génétique, le respect de la contrainte permet de disposer de solutions à énergie zéro dès la génération n° 1, et a fortiori lors des suivantes.

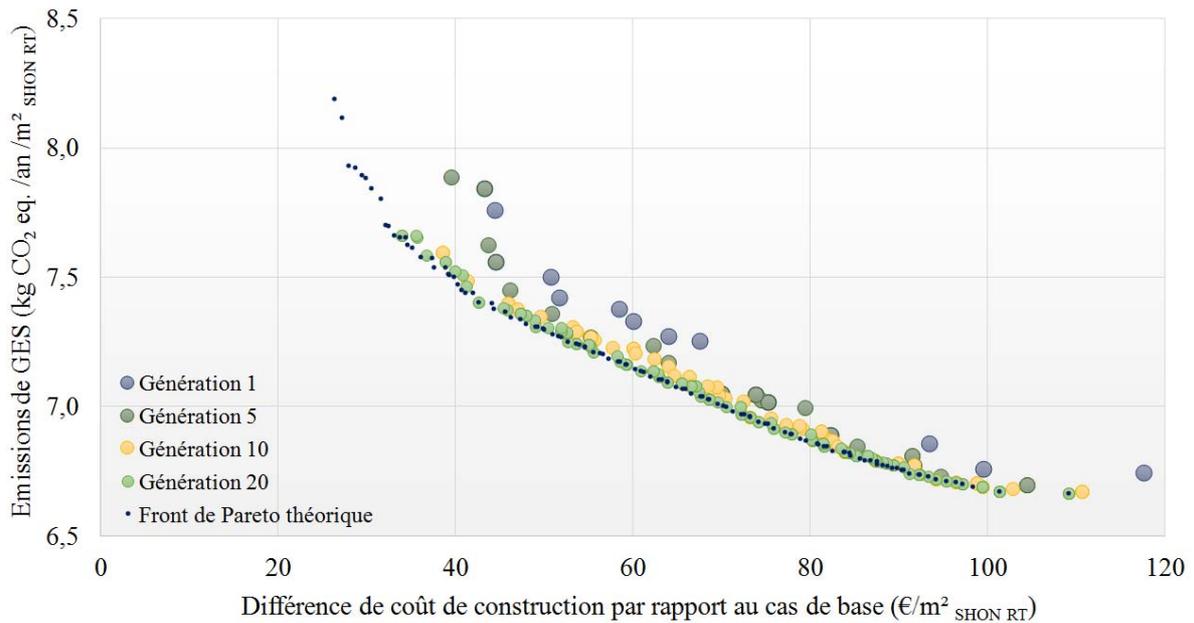


Figure 3 : Évolution des fronts de Pareto, zoom

Dans un espace de recherche de plus de 4 000 000 combinaisons, 8 000 évaluations en deux heures de calculs environ auront suffi à l'algorithme pour converger de manière efficace vers le front de Pareto théorique (calculé ici à titre de validation, sur la base de 4 millions de calculs), même si ce dernier est un peu plus étendu que celui obtenu par l'algorithme génétique.

Il peut être intéressant d'analyser statistiquement quelles sont les caractéristiques des solutions optimales. À titre d'illustration, nous présentons sur la Figure 4, les résultats concernant les équipements. Pour le photovoltaïque, les niveaux correspondent au nombre de modules. La borne supérieure (28) est majoritairement représentée, et aucune solution ne dispose de moins de 22 modules (contre 12 dans le cas de base). Pour les autres équipements, les résultats mettent en évidence des solutions privilégiées, à savoir uniquement des triples-vitrages sur la façade nord-est et un système de ventilation double-flux, et quasiment jamais d'installation de récupérateur de chaleur sur eaux grises. Les résultats obtenus sont proches de ceux du front théorique, et les différences limitées (cf. pointillés en Figure 4).

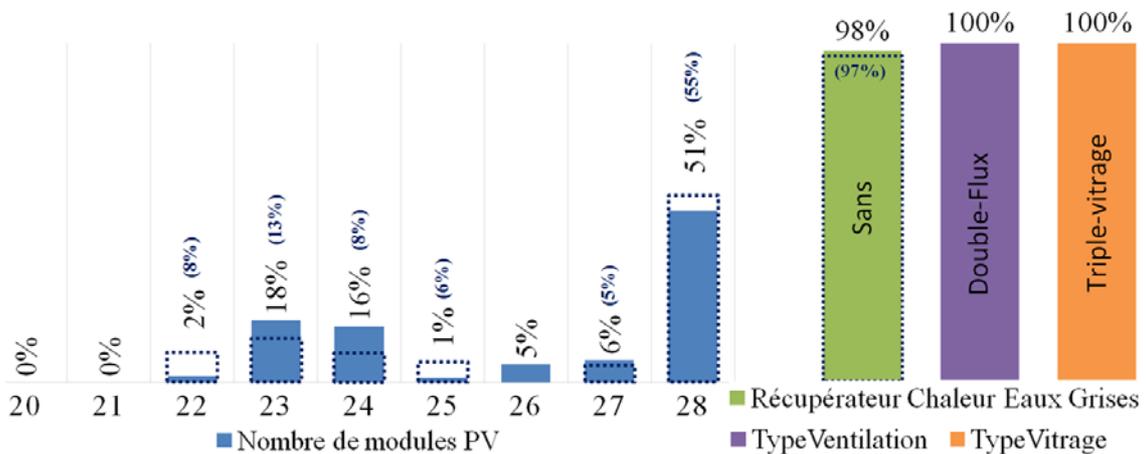


Figure 4 : Caractéristiques des fronts de Pareto obtenu et théorique concernant les équipements

### 3.2 Maison en Bulgarie

La deuxième étude de cas correspond à une maison passive en cours de conception en Bulgarie. Cette maison d'environ 200 m<sup>2</sup> de surface habitable a été modélisée afin de réaliser des simulations thermiques dynamiques (Figure 6), et des données ont été collectées auprès du constructeur sur les coûts unitaires des différents éléments.

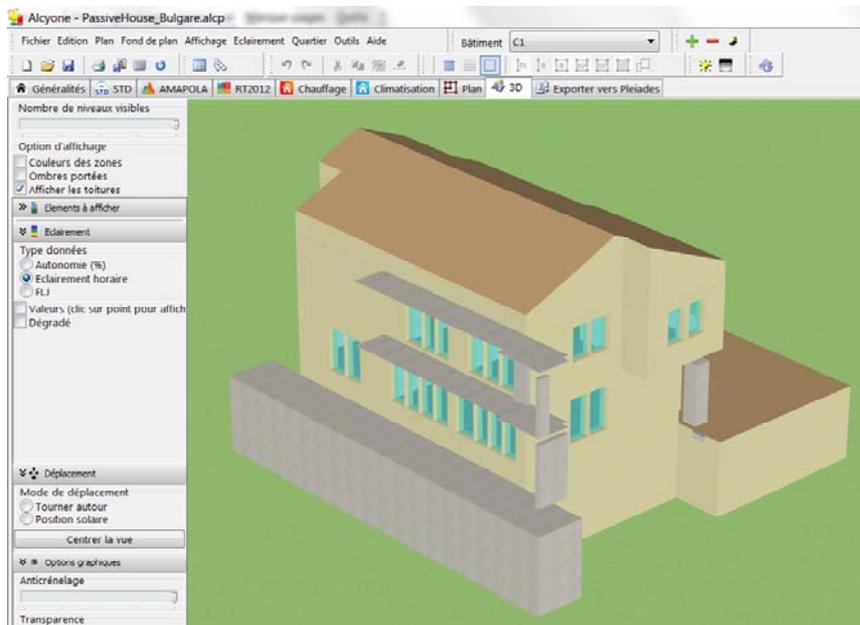


Figure 6 : Cas d'étude en Bulgarie, modèle 3D pour les simulations dynamiques (Pleiades)

Le front de Pareto obtenu par la procédure d'optimisation présentée précédemment montre que le coût de construction, à performance égale, pourrait être réduit de 2600 €, et qu'à budget constant, la consommation nette de la maison pourrait être réduite de 7 kWh/m<sup>2</sup>. Globalement, l'optimisation conduit à remplacer certains triple vitrages par des double vitrages (façades sud), à réduire les surfaces vitrées sur les autres façades (de 10%), à réduire l'épaisseur d'isolant dans les murs (15 cm au lieu de 25) et à augmenter la surface de modules photovoltaïques. Les besoins de chauffage annuels passent alors de 13 à 16 kWh/m<sup>2</sup>, ce qui reste modéré. Ceci étant, l'électricité photovoltaïque supplémentaire est produite plutôt en été alors que la chaleur est consommée plutôt en hiver. Il est alors prévu de reprendre la procédure d'optimisation a) en intégrant l'évaluation des impacts environnementaux par l'analyse de cycle de vie dynamique, b) en considérant les facteurs d'équivalence en énergie primaire de la méthode PHPP et c) en prenant en compte les incertitudes liées au mix de production de l'électricité. Une consommation supérieure n'est alors pas forcément compensée par une production supplémentaire : l'étude de cette question constitue la prochaine étape de ce projet de recherche.

### 4 Vers la garantie de performance énergétique

Garantir la performance énergétique apporte au maître d'ouvrage une meilleure solvabilité, ce qui peut lui donner la possibilité d'obtenir un prêt supplémentaire pour financer une construction zéro énergie. Mais cela présente un risque pour le constructeur, d'où le besoin d'un outil pour maîtriser ce risque, par exemple fixer un seuil qui limite à 5% le risque que la

facture dépasse ce seuil garanti. Il faut aussi prévoir un protocole de mesure et de vérification de la performance.

Un problème est lié aux facteurs qui ne sont pas de la responsabilité des constructeurs, comme par exemple le climat ou le mode de vie des habitants. La notion de paramètres d'ajustement répond à cette question : le seuil est ajusté en fonction par exemple de la consigne de chauffage et de la météo. Par exemple une consommation de 15 kWh/m<sup>2</sup> est garantie pour un chauffage à 20°C, avec un ajustement de +15% par degré supplémentaire.

Le processus élaboré pour la garantie de performance énergétique consiste à évaluer l'incertitude sur la consommation, de manière à déterminer le niveau garanti en considérant un risque de dépassement fixé par exemple à 5%. Une distribution de probabilités est définie pour chaque paramètre incertain (données climatiques par exemple), et la distribution de probabilités sur la consommation est obtenue en tirant au sort ces paramètres (méthode de Monte Carlo).

Une méthode est définie pour ajuster le niveau garanti en fonction de paramètres mesurés qui ne dépendent pas de la qualité des travaux (ceux liés au climat et au comportement des occupants, par exemple la consigne de chauffage, le volume d'eau chaude et l'électricité consommés). Le protocole de mesure et de vérification doit alors inclure non seulement la mesure des consommations énergétiques, mais aussi des températures extérieure et intérieure(s), du volume d'eau chaude consommée et des usages spécifiques de l'électricité. La vérification de la performance consiste à comparer à la facture la consommation ajustée d'après ces mesures, de manière à vérifier si l'engagement de performance a été tenu.

## **5 Conclusions et perspectives**

L'optimisation permet de réduire le coût de construction. La garantie de performance facilite l'investissement. Ces deux outils devraient donc contribuer à la massification des bâtiments zéro énergie.

À titre d'illustration, les résultats de l'optimisation visant à minimiser conjointement le coût de construction et les émissions de CO<sub>2</sub> équivalent, sous une contrainte d'un bilan énergétique positif, ont été présentés, montrant une surface de compromis dont l'analyse des caractéristiques permet d'extraire un ensemble d'informations utiles pour alimenter le processus de prise de décisions. Dans un temps raisonnable (2 heures), l'algorithme a identifié un ensemble de solutions proches du front de Pareto théorique, confirmant sa performance déjà reconnue et esquissant la perspective de mener à l'avenir des explorations plus ambitieuses en termes de nombres de variables de conception, de niveaux de discrétisation, mais aussi de nombre de critères de performance.

Par rapport au label Maison Passive, l'optimisation tend à réduire le coût de construction en réduisant l'isolation (épaisseur réduite, double vitrages au lieu de triple vitrages en façade sud) et en augmentant la surface de modules photovoltaïques. Cela revient à consommer un peu plus d'électricité et à en produire un peu plus, ce qui augmente l'effet de l'incertitude liée à l'évolution du mix de production d'électricité. L'étude de la robustesse des solutions constitue alors un dernier axe de recherche du projet.

## Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet européen A-ZEB, financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne (grant agreement No 754174), et du projet COMEPOS (Conception et construction de maisons à énergie positive) accompagné par l'ADEME dans le cadre du programme Energies Décarbonées des Investissements d'Avenir.

## 6 Références

- Peuportier, Bruno, et Isabelle Blanc-Sommereux. 1990. « Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings ». *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109-20. doi:10.1080/01425919008909714.
- Polster, Bernd. 1995. « Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie ». Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 254 p.
- Recht, Thomas, Fabio Munaretto, Patrick Schalbart, et Bruno Peuportier. 2014. « Analyse de la fiabilité de COMFIE par comparaison à des mesures. Application à un bâtiment passif ». IBPSA France, mai 2014, Arras, France.
- Recht, Thomas, Maxime Robillart, Patrick Schalbart, Bruno Peuportier. 2016 a. Éco-conception de maisons à énergie positive assistée par optimisation multicritère, Conférence IBPSA France, mai 2016, Marne-la-Vallée, France.
- Recht Thomas. 2016 b. Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive. Thèse de doctorat, PSL Research University, 435 p.
- Rivallain, Mathieu. 2013. « Etude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants ». Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 414 p.
- Roux, Charlotte. 2016. Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis, Thèse de doctorat, PSL Research University, 522 p.
- RTE, Réseau de Transport d'Electricité, [www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix](http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix) (accès le 05/12/2017)
- Vorger, Eric. 2014. « Etude de l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 474 p.